博尔塔拉河上游河谷地区水化学特征及水质评价

丁启振[1,2,3]， 雷 米[1,2,3]， 周金龙[1,2,3]， 张 杰[4]， 徐东升[5]

（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052； 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830052； 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052； 4. 南宁师范大学地理科学与规划学院，广西 南宁 530100； 5. 中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300222）

摘　要：为了解博尔塔拉河上游河谷地区地下水和地表水水化学特征及水质状况，以36组水样数据为基础，运用Piper图、相关性分析、Gibbs图和离子比值等方法研究水化学特征及其影响因素，采用熵权-贝叶斯水质评价模型、Wilcox图和USSL图等方法进行水质评价。水化学分析结果显示：（1）研究区机井水、泉水和河水均为弱碱性淡水，总硬度（TH）、溶解性总固体（TDS）、F^-和NO_3^-整体表现为：机井水>泉水>河水，HCO_3^-和Ca^{2+}分别为优势阴、阳离子，博尔塔拉河上游水中各组分含量沿程呈增加趋势；（2）区内机井水和泉水水化学类型以HCO_3-Ca型为主，河水水化学类型主要为HCO_3-Ca型和$HCO_3 \cdot SO_4$-Ca·Na型，水化学特征主要受控于岩石风化作用，水化学组分主要来源碳酸盐岩风化，且存在蒸发盐岩溶解，同时也受阳离子交换作用和人类活动的影响。饮用水水质评价显示，82.6%的机井水和100%的泉水适合饮用或基本适合饮用，或进行适当处理后适合饮用；不适合饮用的水样点主要受Fe、F^-和NO_3^-等超标严重影响；对于灌溉水质评价而言，区内河水、机井水和泉水水质较好均适合灌溉。

关键词：水化学特征； 水质评价； 熵权-贝叶斯水质模型； 博尔塔拉河上游河谷地区； 新疆

水是生命之源、生产之要、生态之基[1]。新疆位于我国西北干旱区，水已成为环境与发展最大的限制因子[2]。区域水质的优劣和水环境质量，直接受水中各化学组分的含量及赋存形态影响[3]。因此，开展地下水和地表水水化学特征研究及水质评价对区域水资源管理、生态环境保护和经济可持续发展具有重要意义。

针对干旱区，国内外学者在地下水和地表水的水化学特征研究及水质评价等方面已开展了大量研究工作，Ma等[4]对咸海盆地锡尔河上游及其支流进行分析，表明河流中离子组分主要来源碳酸盐的溶解，所取水样水质优良，灌溉适宜性较好；Malik等[5]研究得出印度Sardarshahar Tehsil地下水水化学主要受硅酸盐风化控制，其次是受蒸发盐溶解、碳酸盐溶解和阳离子交换过程的影响；所取水样中，不适合饮用的水样占比10%；学者们对我国西北干旱区水化学特征也进行了一定的研究，如：青海省柴达木盆地[6]、甘肃省疏勒河[7]、新疆艾比湖流域[8]和叶尔羌河流域[9]，研究表明水化学特征的主控因素包括水岩作用和蒸发结晶作用，其中水岩作用占主导地位。

博尔塔拉河（以下简称“博河”）上游河谷地区位于新疆温泉县境内，属博河流域。温泉县的饮用水源主要为地下水，农业灌溉水源多取自博河。博河水质直接关系居民生活饮用水安全、农业灌溉水安全和经济社会发展。此外，博河也是艾比湖重要的补给河流，艾比湖作为新疆乃至西北地区重要的生态屏障，目前面临诸多生态问题，已成为社会各界关注的焦点[10]。雷米等[11-12]通过运用同位素技术研究得出博河上游地段浅层地下水与河水转换频繁，因此，全面了解和掌握博河上游河谷地区地下水和地表水水化学特征及水质状况显得尤为重要。

以往针对温泉县水化学特征与水质评价的研究集中于地表水[11,13]，涉及地下水的相关研究较少，且研究区多为整个博河流域，尺度较大。本文基于36组水样数据运用Piper图、相关性分析、Gibbs图和

收稿日期：2021-09-30； **修订日期：**2021-11-17
基金项目：新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心（院士专家工作站）新疆水专项（2020.C-005）
作者简介：丁启振（1998-），男，硕士研究生，主要从事干旱区地下水水质演化的学习与研究. E-mail: 1650655141@qq.com
通讯作者：周金龙. E-mail: zjzhoujl@163.com

离子比值等方法探究水化学特征及影响因素，采用当前应用较广泛的熵权-贝叶斯水质评价模型[14]、Wilcox图和USSL图[15]等方法评估水质状况，以期为温泉县地下水和地表水资源管理及水环境保护提供可靠支撑，为艾比湖生态环境的管理与维护提供一定参考。

1 数据与方法

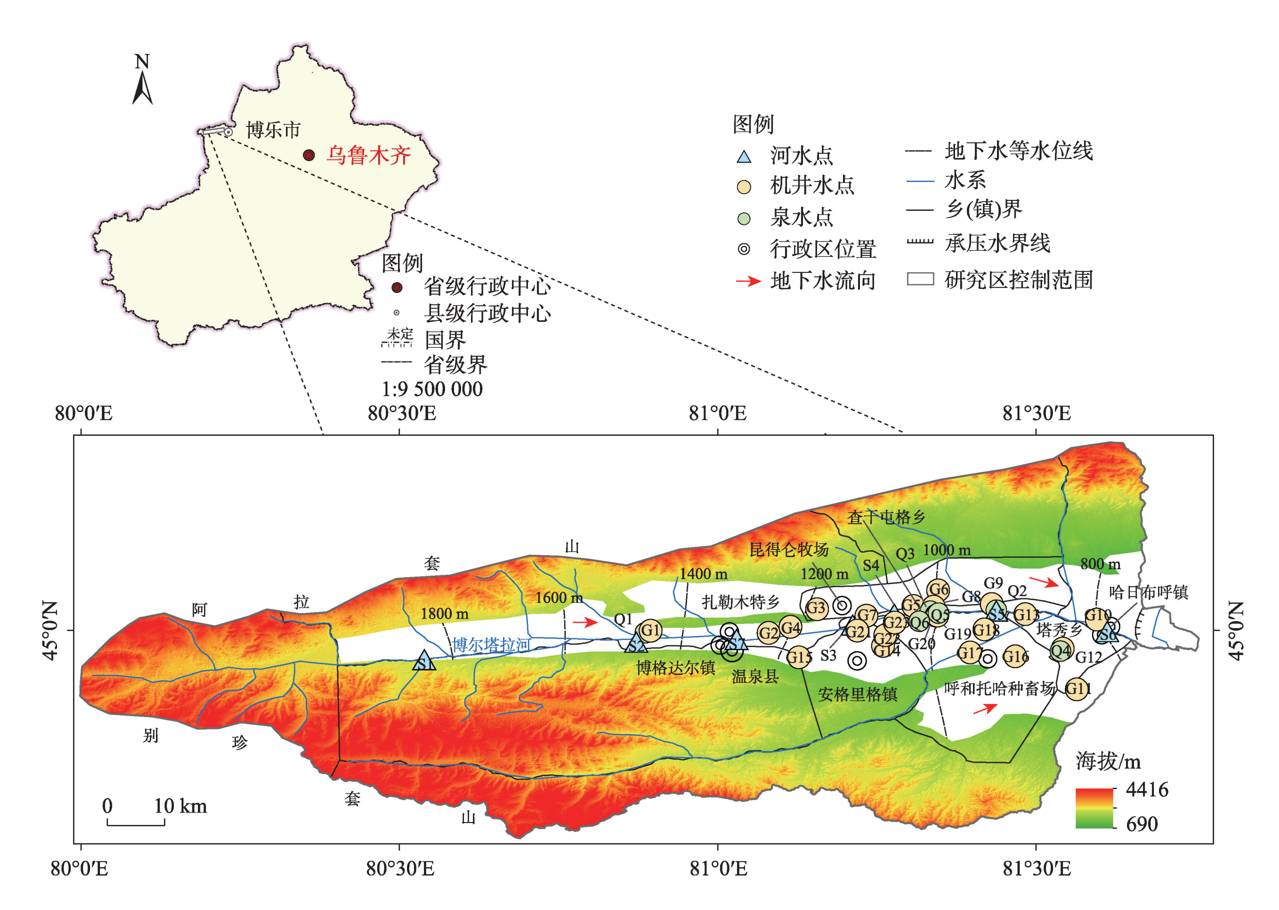
1.1 研究区概况

博河发源于别珍套山和阿拉套山汇合处的洪别林达坂，尾闾湖为艾比湖，流域面积约11367 km^2，全长252.0 km，河网密度0.176，为东西流向，河道平均坡降10‰~8.3‰，多年平均径流量3.189×10^8 m^3（温泉水文站1960—2018年资料）。博河上游河谷地处天山北麓西段，准噶尔盆地西缘，具有三面环山、一面开阔呈喇叭状的地形特点；地势西高东低，向东、北东倾斜。

选取博河上游温泉县平原区为研究区（图1），位于80°32′~81°45′E，44°50′~45°07′N之间。该区属中温带大陆性干旱、半干旱气候区，具有冬暖夏凉、昼夜温差大等特点，多年平均气温3.5 ℃，多年平均蒸发量1554.9 mm，多年平均降水量225.6 mm[11]。区内河床两岸阶地多出露第四系全新统（Q_4）冲洪积物，地层岩性主要为粗砂含砾；冲洪积平原中部主要出露上更新统（Q_3）冲洪积物，地层岩性主要为砂卵砾石；南部近山前埋深>70 m区域处露下-中更新统（Q_{1+2}）冰水堆积物[16-17]。研究区多赋存单一结构孔隙潜水，补给来源主要为河道水入渗、山区洪水入渗、渠系水入渗和灌溉水入渗等；排泄方式以侧向径流、潜水埋深<6 m区域蒸腾蒸发、人工开采和泉水溢出为主。以温泉县城为界，县城以西地下水流向同博河流向基本一致，地下水埋深范围为20~100 m，埋深沿地下水流向逐渐减小；县城以东地下水由博河两岸山前向主河道汇聚，地下水埋深范围为0~100 m，自山前向主河道中心埋深逐渐减小。

1.2 地下水采样及测试

2021年4月在研究区共采集水样36组（机井水23组、泉水6组、河水7组），采样点分布见图1。pH



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区及采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points in study area

由哈纳(HANNA)HI98121笔式测定仪测定,仪器精度±0.02。取样前,聚乙烯瓶用所取水样润洗3次,水样过滤采用0.45 μm的醋酸纤维滤膜,加硝酸酸化至pH<2的水样用于阳离子分析,贴好标签密闭冷藏保存。

水样水化学指标测试由新疆地矿局第二水文地质工程地质大队实验室完成。采用火焰原子吸收分光光度法测定K^+和Na^+,用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-}和总硬度(TH,以$CaCO_3$计),用硝酸银容量法测定Cl^-,用硫酸钡比浊法测定SO_4^{2-},检测限均为0.05 mg·L^{-1};采用离子选择电极法测定F^-,采用紫外分光光度法测定NO_3^-(以N计),检出限均为0.20 mg·L^{-1};使用电子天平MP8-1测定溶解性总固体(TDS),检出限为0.10 mg·L^{-1}。

1.3 研究方法

1.3.1 数据分析 取样点分布图和水化学类型分区图(运用普通克里金插值方法)由ArcGIS 10.2绘制,运用Orign 2017绘制剩余图件,运用SPSS 20.0进行相关性分析,部分数据的统计与分析由Excel完成。

1.3.2 熵权-贝叶斯水质评价

(1) 熵权法计算权重系数

熵权法考虑到不同指标的相对重要性,客观计算指标权重,尽量消除各因素权重主观性,更符合实际[18]。基本原理是通过指标变异性的大小来确定权重。一般认为,信息熵越大,表明变异程度越小,提供的信息量越少,其权重就越小;相反,信息熵越小,其权重越大[14]。计算步骤如下[18]:

① 构造m个评价对象、n个评价指标的判断矩阵$T=(t_{ij})_{m\times n}(i=1, 2,\cdots, n; j=1, 2,\cdots, m)$。

② 判断矩阵归一化处理,得到归一化矩阵$B=(b_{ij})_{m\times n}(i=1, 2,\cdots, n; j=1, 2,\cdots, m)$。其中,越小越优型的指标,公式如下:

$$b_{ij}=\frac{\max\{t_{ij}\}-t_{ij}}{\max\{t_{ij}\}-\min\{t_{ij}\}} \tag{1}$$

越大越优型的指标,公式如下:

$$b_{ij}=\frac{t_{ij}-\min\{t_{ij}\}}{\max\{t_{ij}\}-\min\{t_{ij}\}} \tag{2}$$

式中:t_{ij}表示第m个评价对象第n项指标实测值。

③ 指标熵(H_i)的计算,公式如下:

$$H_i=-k\sum_{j=1}^{m}f_{ij}\ln f_{ij} \tag{3}$$

式中:f_{ij}表示第m个评价对象第n项指标值在所有评价对象中所占的比重。$f_{ij}=b_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{m}b_{ij}$;$k=1/\ln m$;当$f_{ij}=0$时,令$f_{ij}\ln f_{ij}=0$。

④ 指标熵权(w_i)的计算,公式如下,且满足$\sum_{i=1}^{n}w_i=1$。

$$w_i=\frac{1-H_i}{n-\sum_{i=1}^{n}H_i} \tag{4}$$

(2) 贝叶斯水质模型

在贝叶斯原理的基础上,将传统贝叶斯水质模型引用至水质评价,并改写为公式(5)[19]。

$$P\left(y_{ji}\middle|x_j\right)=\frac{P(y_{ji})P(x_j|y_{ji})}{\sum_{i=1}^{n}P(y_{ji})P(x_j|y_{ji})} \tag{5}$$

式中:y_{ji}表示水质等级值;x_j表示实测水质指标值;i表示水质分级;j表示指标选取个数。

(3) 贝叶斯水质评价步骤

① 计算水质等级的先验概率$P(y_{ji})$。一般认为,所测水样属于任一等级的概率相等,即:$P(y_{j1})=P(y_{j2})=P(y_{j3})=P(y_{j4})=P(y_{j5})=1/5$。

② 基于实测指标与标准指标间距离绝对值(L_{ji})的倒数,采用几何概率中距离法计算$P(x_j|y_{ji})$,公式如下:

$$P\left(x_j\middle|y_{ji}\right)=\frac{1/L_{ji}}{\sum_{i=1}^{5}1/L_{ji}} \tag{6}$$

式中:$L_{ji}=|x_j-y_{ji}|(j=1, 2, 3; i=1, 2,\cdots, 5)$。

③ 计算综合后验概率,公式如下:

$$P_i=\sum_{j=1}^{3}w_iP(y_{ji}|x_j) \tag{7}$$

④ 根据最大概率原则确定水质所属类别,即$P_h=\max P_i$,i=1~5,P_h表示最大综合后验概率。

1.3.3 灌溉水水质评价 在进行灌溉水质评价过程中,需要钠吸附比(SAR)和钠百分比(SSP)2个评价参数。SAR是反映灌溉水或土壤溶液中钠相对含量的1个重要参数,可用来衡量灌溉水所引起的土壤盐碱化程度[20]。土壤吸附Na^+的能力可随SAR值的增大而减弱,土壤结构团粒结构从而遭到破坏,降低土壤渗透性[21]。计算公式如下:

$$\mathrm{SAR}=\frac{\mathrm{Na^+}}{\sqrt{(\mathrm{Ca^{2+}}+\mathrm{Mg^{2+}})/2}} \tag{8}$$

式中：离子单位均为meq·L^{-1}。

钠百分比(SSP)也是反映灌溉水盐碱害的重要参数之一，SSP升高，土壤渗透性变差，会减缓作物生长[22]。计算公式如下：

$$SSP = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \tag{9}$$

2 结果与分析

2.1 水化学特征分析

2.1.1 水化学特征参数统计特征 由表1可知，研究区机井水、泉水和河水整体表现出弱碱性，pH介于7.31~8.68之间，均值7.88；3种水体的TDS均值均<1000 mg·L^{-1}，为淡水，其中河水的TDS均值为156.52 mg·L^{-1}，高于115 mg·L^{-1}(世界河流平均值)[23]；相关研究表明，某一水体与可溶矿物接触时间越久，其TDS值越大[24]，机井水、泉水和河水中TDS均值依次减小，表明其更新速率可能依次增加；根据TH均值区分水体的软硬程度，机井水和泉水分别属于微硬水(150 mg·L^{-1}<TH<300 mg·L^{-1})和软水(75 mg·L^{-1}<TH<150 mg·L^{-1})，河水属于软水(55 mg·L^{-1}<TH均值<150 mg·L^{-1})。

研究区主要阳离子含量均值排序中，机井水、泉水和河水均表现为：Ca^{2+}>K^++Na^+>Mg^{2+}；阴离子含量均值排序中，机井水和泉水均表现为：HCO_3^->SO_4^{2-}>NO_3^->Cl^->F^-，而河水表现为：HCO_3^->SO_4^{2-}>Cl^->NO_3^->F^-(表1)。分析可知，河水中F^-、Cl^-和NO_3^-排序与机井水、泉水有一定相似性，表明机井水和泉水分别与河水可能存在水力联系。F^-、NO_3^-浓度均值大小排列顺序均为：机井水>泉水>河水。机井水、泉水和河水的F^-均值较低，分别为0.71 mg·L^{-1}、0.48 mg·L^{-1}和0.40 mg·L^{-1}，可能来源于矿物溶解。

区内机井水、泉水和河水的所有参数中，仅pH的变异系数(C_V)≤0.1，为弱变异；剩余参数均为中等变异(0.1<C_V<1.0)。泉水和河水中NO_3^-变异系数均最大，机井水中SO_4^{2-}和NO_3^-变异系数(C_V)>0.80(表1)，以上说明离子组分空间分布不稳定，局部地区水质可能受人类污染影响。

2.1.2 水化学类型及空间分布特征 由图2可知，研究区内机井水、泉水和河水的阳离子集中分布于三角图的左下方靠近Ca-Na线附近，Ca^{2+}是主要离子；阴离子集中分布于三角图左下方靠近HCO_3-SO_4线附近，HCO_3^-为主要离子。大多数河水点被机井水点、泉水点包围，表明机井水、泉水和河水之间存在较为密切的水力联系。机井水、泉水的主要水化学类型均为HCO_3-Ca型，河水的水化学类型以HCO_3-Ca型和HCO_3·SO_4-Ca·Na型为主。在阴、阳

表1 水化学特征参数统计

Tab. 1 Statistical results of water chemical characteristic parameters

地下水类型	统计值	pH	TH	TDS	阳离子			阴离子				
					K^++Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	F^-	NO_3^-
机井水(*n*=23)	最小值	7.47	78.33	132.38	9.69	24.53	1.95	5.67	13.74	95.23	0.25	1.95
	最大值	8.08	301.26	708.48	127.66	88.48	37.32	42.54	248.01	332.08	1.92	44.68
	均值	7.85	152.51	265.12	30.28	48.85	7.41	12.79	51.94	168.43	0.71	16.54
	标准差	0.18	55.57	121.51	25.18	15.39	7.18	8.95	47.85	55.21	0.51	13.71
	变异系数	0.02	0.36	0.46	0.83	0.32	0.97	0.70	0.92	0.33	0.72	0.83
泉水(*n*=6)	最小值	7.31	97.41	152.06	12.82	35.79	1.95	7.09	20.34	115.98	0.26	3.76
	最大值	7.90	210.88	318.10	34.26	70.38	10.98	14.18	84.05	195.34	1.06	26.61
	均值	7.69	148.62	232.29	20.72	50.40	5.53	9.45	45.68	155.66	0.48	12.12
	标准差	0.27	45.61	72.96	8.93	13.21	3.53	3.66	28.35	32.46	0.31	9.68
	变异系数	0.03	0.31	0.31	0.43	0.26	0.64	0.39	0.62	0.21	0.64	0.80
河水(*n*=7)	最小值	7.83	63.26	96.57	10.47	23.73	0.98	2.84	6.17	81.80	0.19	2.58
	最大值	8.68	147.62	254.71	29.01	47.46	7.07	17.02	52.82	156.27	0.63	11.79
	均值	8.12	97.98	156.52	16.47	32.92	3.83	8.20	26.72	108.48	0.40	5.49
	标准差	0.30	30.44	54.56	6.42	9.26	2.12	4.63	14.35	30.73	0.18	3.65
	变异系数	0.04	0.31	0.35	0.39	0.28	0.55	0.56	0.54	0.28	0.44	0.67

注：除pH以及变异系数为无量纲外，其余参数单位均为mg·L^{-1}；*n*为样品数。

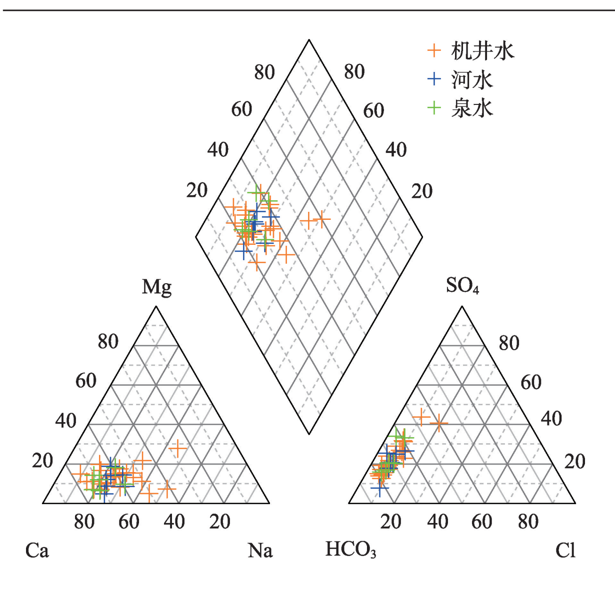


图2 水化学Piper三线图

Fig. 2 Piper trigram of hydrochemistry

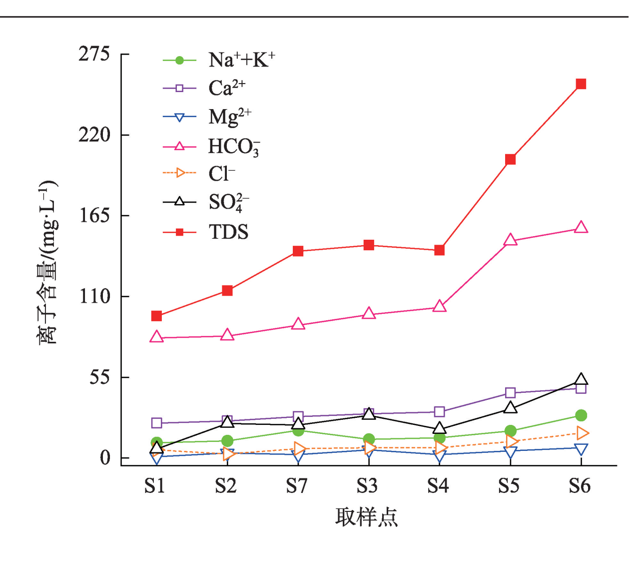


图3 博河上游沿程取样点组分含量变化

Fig. 3 Composition changes at sampling points along Bortala River

离子三角图中靠近 HCO_3 一侧与靠近Ca-Mg一端均表示为碳酸盐岩风化区[25]。由此推断，研究区内水化学主要受碳酸盐岩风化影响。

由图3可知，整体上河水中除 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 沿程变化表现为连续增加外，其余组分均呈波动增加趋势，与玛尔胡拜·牙生等[13]研究得出的结论基本一致。S1-S2-S7-S3段，除TDS和 HCO_3^- 明显上升外，剩余离子变化均表现为相对平稳；S4-S6段，所有组分均表现为连续增加，其中TDS表现为急剧增加。S4-S6段河水TDS均值为199.82 mg·L⁻¹，机井水和泉水TDS均值分别为224.13 mg·L⁻¹和218.15 mg·L⁻¹，TDS急剧增加的原因可能是河水受到机井水或泉水的补给[26]。

由图4可知，呼哈托哈种畜场、安格里格镇和扎勒木特乡西部广泛分布 HCO_3 型水；哈日布呼镇、塔秀乡、昆得仑牧场东部、查干屯格乡局部和温泉县城区及其北部主要分布 $HCO_3·SO_4$ 型水。温泉县城以西，补给径流条件好，水化学类型主要为以溶滤作用为主的 HCO_3 型；温泉县城以东博河两岸水化学类型差异明显，北岸水化学类型以 $HCO_3·SO_4$ 型为主，南岸水化学类型主要为 HCO_3 型水。

2.2 水化学成因分析

2.2.1 相关性分析 由表2可知，机井水和河水中TDS与除 F^- 和pH外的其他8项水化学组分均具有较好的相关性，其中与 K^+、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 呈高度相关，相关系数>0.80，表明这几种离子含量对TDS影响较大；而泉水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 对TDS影响较大。机井水、河水中的 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 均分别与 HCO_3^- 呈正相关，说明机井水、河水中可能发生碳酸盐岩(石灰岩和白云岩等)的风

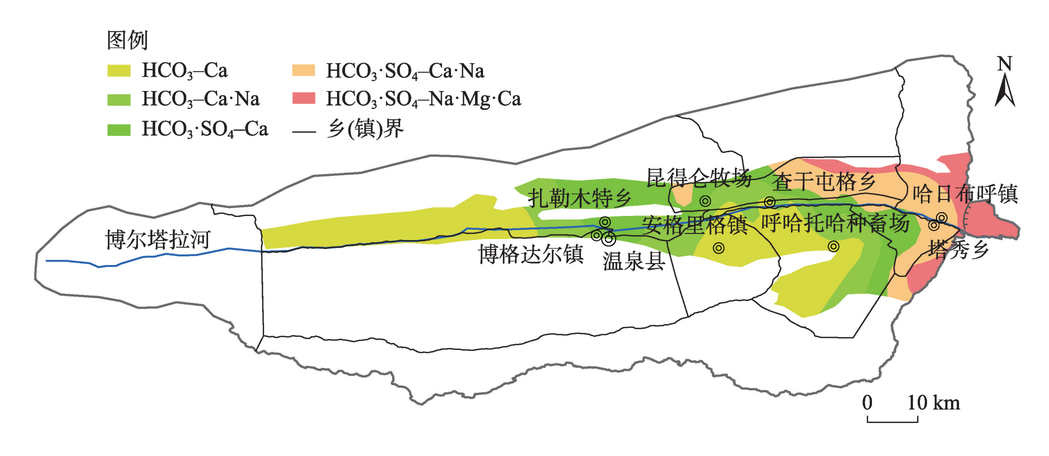


图4 地下水水化学类型分区

Fig. 4 Zoning map of groundwater hydrochemical types

表2 水体中主要水化学组分相关性

Tab. 2 Correlation statistics of main hydrochemical components in water body

		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	F^-	TDS	pH	
机井水	K^+	1	0.658	0.965**	0.792*	0.832*	0.821*	0.964**	0.666	0.501	0.905**	−0.285	河水
	Na^+	0.830**	1	0.824*	0.668	0.891**	0.858*	0.805*	0.685	0.716	0.910**	0.102	
	Ca^{2+}	0.355	0.156	1	0.784*	0.938**	0.872*	0.998**	0.736	0.620	0.978**	−0.201	
	Mg^{2+}	0.776**	0.826**	0.324	1	0.738	0.941**	0.760*	0.548	0.277	0.833*	0.016	
	Cl^-	0.755**	0.922**	0.268	0.714**	1	0.838*	0.938**	0.787*	0.578	0.958**	−0.148	
	SO_4^{2-}	0.798**	0.940**	0.300	0.908**	0.900**	1	0.847*	0.674	0.475	0.937**	−0.007	
	HCO_3^-	0.735**	0.619**	0.755**	0.798**	0.548**	0.679**	1	0.727	0.599	0.966**	−0.239	
	NO_3^-	0.308	0.103	0.827**	0.147	0.186	0.137	0.569**	1	0.301	0.757*	−0.478	
	F^-	0.112	0.237	0.217	−0.164	0.314	0.090	0.077	0.297	1	0.635	0.416	
	TDS	0.847**	0.879**	0.588**	0.886**	0.855**	0.926**	0.881**	0.450*	0.193	1	−0.092	
	pH	0.244	0.308	0.027	0.230	0.275	0.315	0.095	0.069	−0.023	0.258	1	
泉水	K^+	1											
	Na^+	0.847*	1										
	Ca^{2+}	0.621	0.472	1									
	Mg^{2+}	0.837*	0.563	0.814*	1								
	Cl^-	0.882*	0.950**	0.299	0.553	1							
	SO_4^{2-}	0.692	0.462	0.921**	0.953**	0.372	1						
	HCO_3^-	0.713	0.680	0.956**	0.764	0.495	0.839*	1					
	NO_3^-	0.939**	0.894*	0.357	0.605	0.967**	0.409	0.524	1				
	F^-	0.413	0.790	0.411	0.219	0.591	0.260	0.637	0.461	1			
	TDS	0.867*	0.753	0.912*	0.916*	0.651	0.918**	0.943**	0.679	0.531	1		
	pH	0.225	0.369	−0.508	−0.040	0.562	−0.255	−0.374	0.438	0.074	−0.129	1	

注:*表示在0.05水平(双侧)显著相关;**表示在0.01水平(双侧)显著相关。

化溶解[27]。而泉水中Ca^{2+}与HCO_3^-呈高度相关,相关系数>0.95,基本呈线性分布,说明泉水中主要发生方解石的溶解[28]。机井水、泉水中K^+和Na^+表现出显著相关,说明主要来源于蒸发盐溶解[29]。泉水和河水中Cl^-与NO_3^-均呈显著相关,说明泉水和河水的水化学组分受人类活动影响显著[30]。机井水、泉水和河水中未发现F^-与任何其他组分有很强的相关性。

2.2.2 Gibbs图分析 由图5可知,图中被划分为岩石风化、大气降水和蒸发-结晶3个端元,大气降水端元附近无取样点分布,说明区内气候干旱,稀少的大气降水所能带来的可溶性离子可忽略不计[9]。大部分取样点均落入虚线内部,且分布在岩石风化端元附近,少量机井水和河水取样点分布在线外,表明研究区内水化学主要由岩石风化作用控制。总体来看,岩石的风化溶解为研究区内水化学特征的主控因素。

2.2.3 离子比值分析 离子比值可进一步确定不同岩石风化对水化学组分的影响[31]。从图6可知,研究区机井水、泉水和河水的水化学径流组成介于碳酸盐岩流域与硅酸盐岩流域之间,且偏向碳酸盐岩流域。表明区内水体主要受碳酸盐岩石风化影响。

当水中$\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma(HCO_3^-)<1$时,表示水化学成分主要受碳酸盐岩溶解的影响,反之则为蒸发盐岩溶解[32]。图7a显示,研究区内机井水、泉水及河水取样点绝大多数位于直线$y=x$下方,极个别机井水取样点位于上方,表明水化学成分主要来源于碳酸盐岩溶解,受蒸发盐岩溶解影响微弱。

当水中$\gamma(K^++Na^+)/\gamma(Cl^-)\approx1$时,表示水化学成分受蒸发盐岩溶解的影响[33]。然而图7b显示,区内机井水、泉水及河水取样点均位于$y=x$直线上方,过量的K^++Na^+可能来自于阳离子的交换过程。

当水中$\gamma(Ca^++Mg^+)/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})<1$时,表示水化学成分主要受碳酸盐岩的溶解影响,反之为钙镁硅酸盐岩或蒸发盐岩的风化溶解[34]。图7c显示,区内河水、机井水及泉水取样点均位于$y=x$直线下方,表明Ca^+和Mg^+形成主要受碳酸盐岩溶解的控

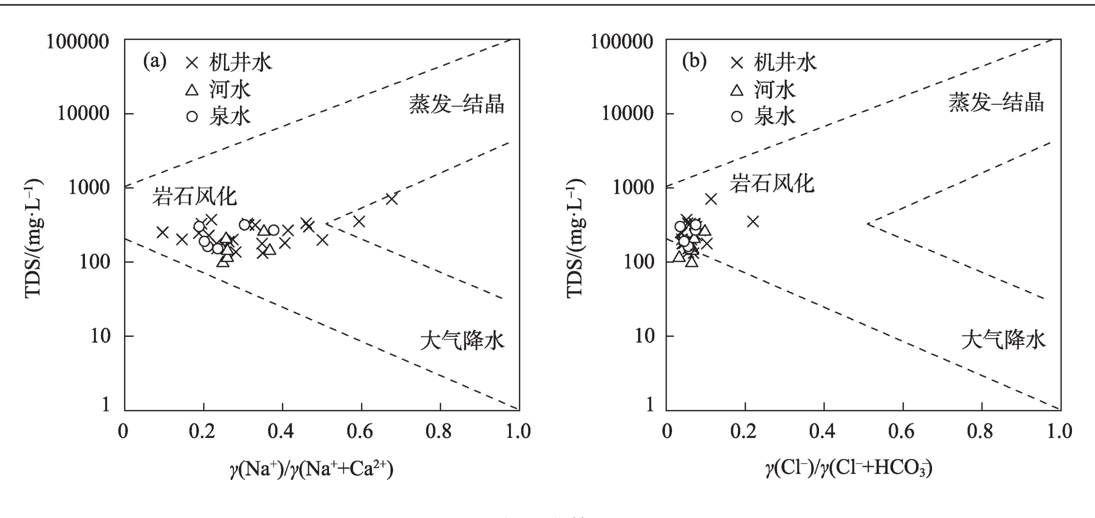


图5 研究区水体Gibbs图

Fig. 5 Gibbs diagram of water body in the study area

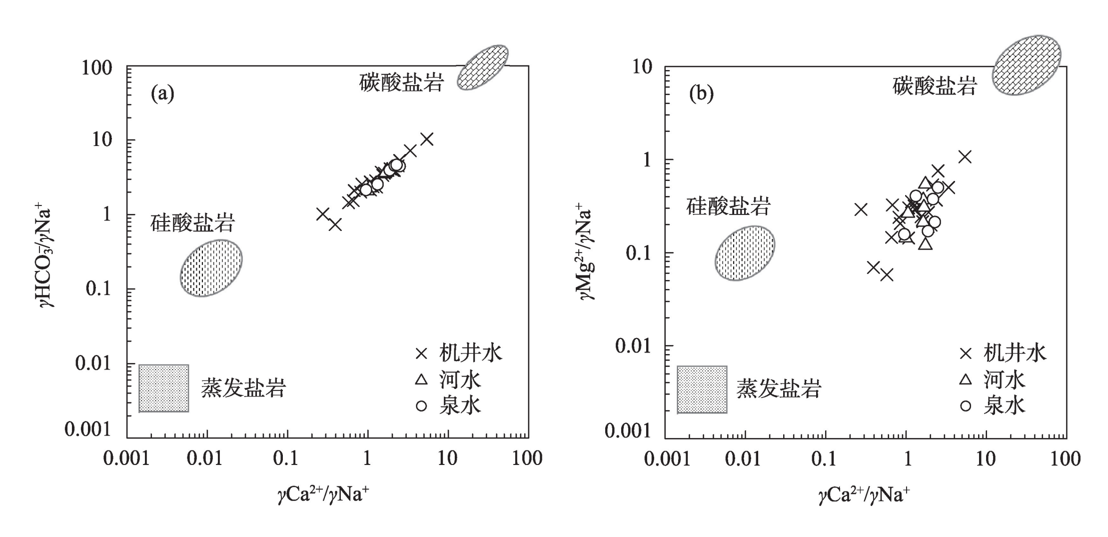


图6 水体离子比值端元图

Fig. 6 End-member diagram of water body

制，且存在阳离子交换过程。

同时，一定量的Ca^{+}和Mg^{+}也可由水体的阳离子交换作用产生，图7d中$\gamma(Ca^{+}+Mg^{+})-\gamma(HCO_3^- + SO_4^{2-})$与$\gamma(Na^{+}-Cl^{-})$的比值越接近−1，表示$Ca^{+}$和$Mg^{+}$之间的交换作用越强烈[35]，可以看出，取样点分布与直线$y=-x$近乎重合，表明水体存在强烈的阳离子交换作用。

2.3 水质评价

2.3.1 地下水饮用水水质评价 本文基于熵权法客观计算权重，采用贝叶斯水质评价模型对地下水进行饮用水水质评价。根据检测结果，选取检测率高且存在超标的F^-、NO_3^-和Fe等指标作为评价指标。评价指标标准值在《地下水质量标准》(GB/T 14848–2017)的基础上，利用胡漾等[36]评价模型的方法修正得到。

由表3可知，研究区适合饮用的(Ⅰ和Ⅱ类)机井水的水样点有9个(占比39.1%)；基本适合饮用的(Ⅲ类)机井水的水样点有6个(占比26.1%)；适当处理后适合饮用的(Ⅳ类)机井水的水样点有4个(占比17.4%)；不适合饮用的(Ⅴ类)机井水的水样点有4个(占比17.4%)。适合饮用的泉水的水样点有3个(占比50.0%)；基本适合饮用的泉水的水样点有1个(占比16.7%)；适当处理后适合饮用的泉水的水样点有2个(占比33.3%)。从研究区水质评价的总体结果来看，研究区内泉水相比机井水而言更适合饮用。

另外，不适合饮用的水样点分布在呼和托哈种畜场、昆得仑牧场和查干屯格乡。其中，呼和托哈种畜场机井水主要受NO_3^-超标严重的影响，昆得仑牧场和查干屯格乡机井水主要受Fe、F^-和NO_3^-超标

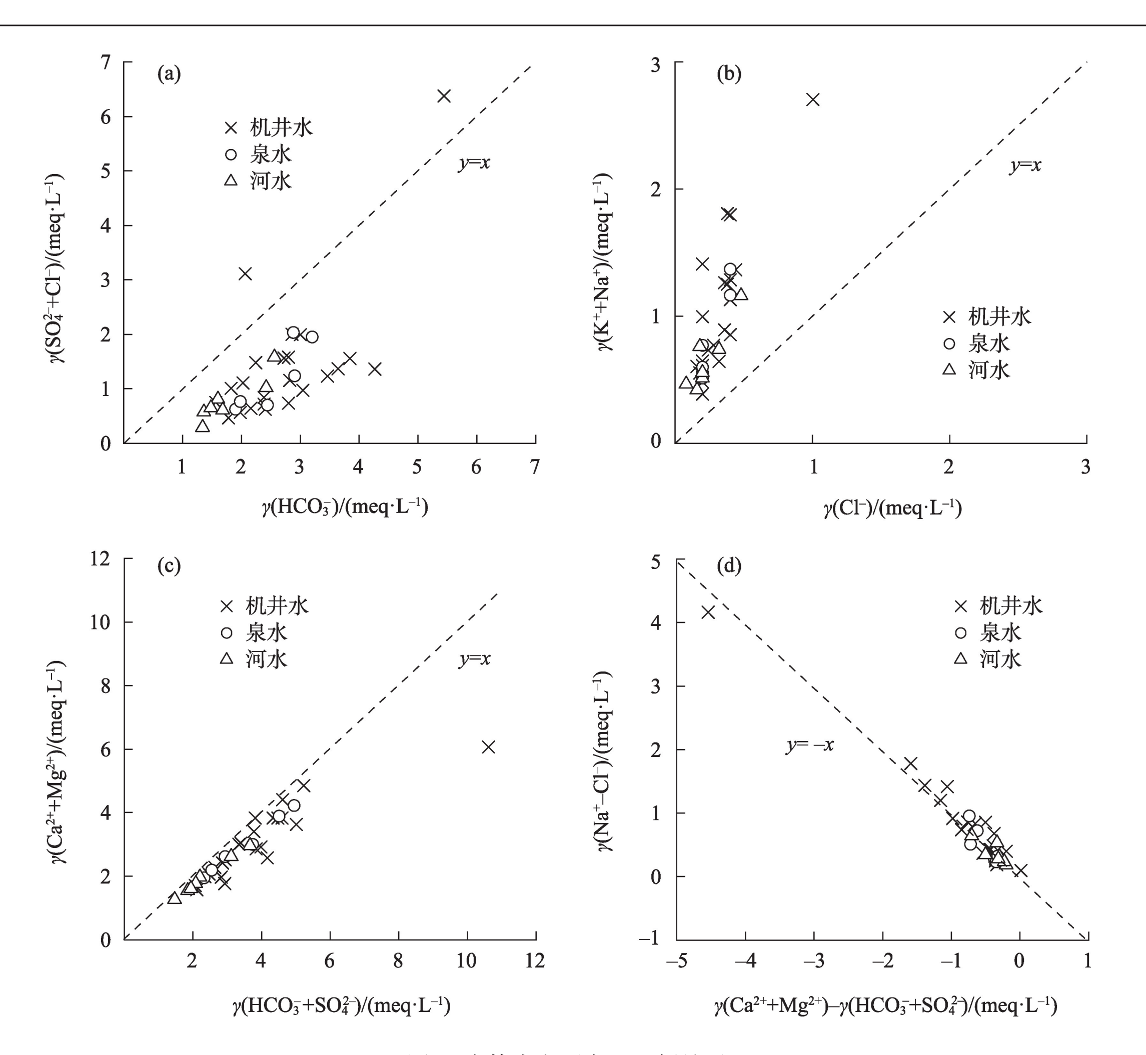


图7　水体中主要离子比例关系

Fig. 7　Proportion relationship of main ions in water body

表3　饮用水水质评价结果

Tab. 3　Assessment results of drinking water quality

类型	乡镇	编号	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	类别	乡镇	编号	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	类别
机井水	扎勒木特乡	G1	0.28	0.46	0.14	0.07	0.05	Ⅱ	查干屯格乡	G5	0.13	0.15	0.26	0.41	0.05	Ⅳ
		G2	0.28	0.29	0.26	0.10	0.07	Ⅱ		G8	0.20	0.16	0.16	0.24	0.24	Ⅳ
		G4	0.56	0.22	0.13	0.06	0.04	Ⅰ		G9	0.13	0.09	0.08	0.27	0.44	Ⅴ
	昆得仑牧场	G3	0.34	0.15	0.06	0.27	0.18	Ⅰ	塔秀乡	G12	0.50	0.27	0.13	0.05	0.04	Ⅰ
		G6	0.10	0.10	0.21	0.21	0.39	Ⅴ		G13	0.22	0.19	0.24	0.23	0.12	Ⅲ
		G7	0.14	0.14	0.16	0.27	0.30	Ⅴ	呼和托哈种畜场	G16	0.22	0.19	0.40	0.11	0.07	Ⅲ
	哈日布呼镇	G10	0.20	0.17	0.55	0.05	0.03	Ⅲ		G17	0.18	0.15	0.13	0.47	0.07	Ⅳ
		G11	0.26	0.16	0.45	0.08	0.05	Ⅲ		G18	0.22	0.18	0.18	0.18	0.25	Ⅴ
	安格里格镇	G14	0.23	0.20	0.19	0.17	0.20	Ⅰ		G19	0.31	0.38	0.18	0.08	0.06	Ⅱ
		G15	0.19	0.16	0.15	0.42	0.09	Ⅳ		G20	0.24	0.22	0.37	0.10	0.07	Ⅲ
		G21	0.29	0.46	0.14	0.07	0.05	Ⅱ		G23	0.60	0.18	0.12	0.06	0.04	Ⅰ
		G22	0.21	0.13	0.56	0.06	0.04	Ⅲ								
泉水	扎勒木特乡	Q1	0.16	0.51	0.23	0.06	0.04	Ⅱ	塔秀乡	Q4	0.19	0.16	0.15	0.33	0.17	Ⅳ
	查干屯格乡	Q2	0.23	0.20	0.22	0.25	0.10	Ⅳ	呼和托哈种畜场	Q5	0.31	0.38	0.18	0.08	0.06	Ⅱ
		Q3	0.31	0.38	0.19	0.07	0.05	Ⅱ		Q6	0.25	0.24	0.34	0.10	0.07	Ⅲ

严重的影响。温泉县经济以农牧业为主，NO_3^-超标可能主要来源于动物粪便、农药化肥过量施用和生活污水排放[37]。冯翠娥等[38]研究得出，当发育有漫滩相沉积物或在地势低洼和地下水的排泄地带，地下水中Fe、F^-离子易发生富集。昆得仑牧场和查干屯格乡地下水埋深较浅，且超标点主要位于博河沿岸滩地，由此推断F^-、Fe的超标可能与自然地质环境有关。

2.3.2 *灌溉水水质评价* 为综合表征灌溉水的盐害和碱害，采用USSL图和Wilcox图对灌溉水水质进行图解分类（图8）。USSL图的横、纵坐标分别为25 ℃时EC值（盐害）和SAR（碱害），被划分为4×4个区域，水质从下至上、从左至右逐渐变差。Wilcox图的横、纵坐标分别为25 ℃时EC值（盐害）和SSP（碱害），图8b被划分为5个区域，即水质优秀区、水质良好区、水质可接受区、水质保留区和水质不适宜区，水质依次变差。

由图8a可知，5个机井水、2个泉水和5个河水取样点均落入C1–S1区域，17个机井水、4个泉水和2个河水取样点均落入C2–S1区域，只有1个机井水

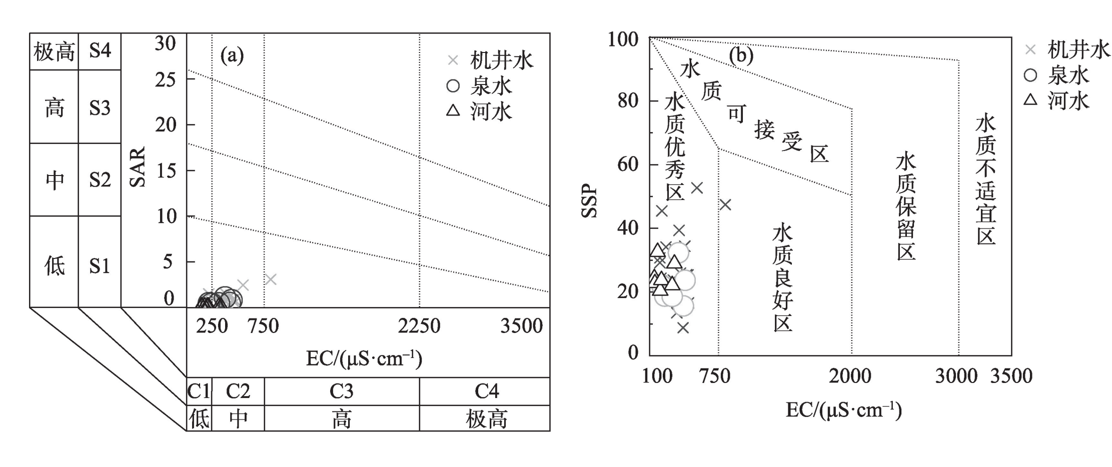


图8 灌溉水质分类的USSL图（a）和Wilcox图（b）

Fig. 8 USSL diagram (a) and Wilcox Diagram (b) of irrigation water quality classification

取样点落入C3–S1区域，表明综合SAR和EC考虑，区内水样碱度危害低，盐度危害以低、中为主，可用于农业灌溉。由图8b可知，除1个机井水取样点落入水质良好区外，其余取样点均位于水质优秀区，表明综合SAR和EC值考虑，区内所有水样水质较好，均可直接进行灌溉。

另外，唯一落入C3–S1区域的机井水取样点编号为G11，其TDS值为所取水样中最大，达708.48 mg·L⁻¹（表1），位于哈日布呼镇且远离地表水水源，灌溉多采用地下水。刘宗潇等[39]研究得出，随灌水矿化度增加，土壤总EC值变大，由此推断EC值过高的原因可能是地下水受到灌溉水的渗入补给。

3 结 论

以博河上游河谷地区地下水（机井水、泉水）和地表水为研究对象，运用水化学的相关理论和方法对水化学特征进行分析，并采用熵权–贝叶斯水质评价模型对区域水质进行评价，得出如下结论：

（1）研究区机井水、泉水和河水整体为弱碱性淡水，TH、TDS、NO_3^-和F^-含量均值均表现为：机井水>泉水>河水，机井水属于微硬水，泉水和河水属于软水。博河上游水中各组分含量沿程呈增加趋势，TDS均值为156.52 mg·L⁻¹，高于115 mg·L⁻¹（世界河流平均值）。

（2）机井水、泉水和河水主要阳离子均呈现$Ca^{2+}>K^++Na^+>Mg^{2+}$，机井水和泉水阴离子均呈现$HCO_3^->SO_4^{2-}>NO_3^->Cl^->F^-$，河水呈现$HCO_3^->SO_4^{2-}>Cl^->NO_3^->F^-$，$HCO_3^-$和$Ca^{2+}$均分别为优势阴、阳离子。区内机井水和泉水水化学类型相对单一，均以HCO_3–Ca型为主，河水水化学类型主要为HCO_3–Ca型和$HCO_3·SO_4$–Ca·Na型。

（3）饮用水水质评价结果显示，区内82.6%的机井水和100%的泉水适合饮用或基本适合饮用或适当处理后适合饮用，泉水相比机井水而言更适合饮用。灌溉水的水质评价结果发现，区内河水、机井水和泉水的水质优，灌溉适宜性较好。

（4）区内地表水、地下水联系密切，水化学特征的形成主要受控于岩石风化作用，水化学组分主要来源于碳酸盐岩风化，且存在蒸发盐岩溶解，阳离子交换作用和人类活动对其也有一定影响。饮用水水质主要受Fe、F^-和NO_3^-超标严重的影响，与人类活动和自然地质环境有关；个别地下水的水样点EC值偏高的原因可能是地下水受到灌溉水的渗入补给。

参考文献（References）：

[1] 张飞, 陈道胜. 世界水日、中国水周主题下的水资源发展回顾与展望[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 77−86, 94. [Zhang Fei, Chen Daosheng. Review and outlook on water resources development based on China water week and world water day[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 77−86, 94.]

[2] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262−269. [Xia Jun, Zhu Yizhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262−269.]

[3] 杨森, 李义连, 姜凤成, 等. 高店子幅水化学特征及水质评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 226−234. [Yang Sen, Li Yilian, Jiang Fengcheng, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Gaodianzi map-area[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2): 226−234.]

[4] Ma L, Abuduwaili J, Li Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment for the upper reaches of Syr Darya River in Aral Sea Basin, Central Asia[J]. Water, 2019, 11(9): 1893.

[5] Malik N, Malik A, Bishnoi S. Assessment of groundwater hydrogeochemistry, quality, and human health risk in arid area of India using chemometric approach[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(15): 1−25.

[6] 张景涛, 史浙明, 王广才, 等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 194−205. [Zhang Jingtao, Shi Zheming, Wang Guangcai, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Dachaidan area, Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 194−205.]

[7] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3315−3324. [Zhou Jiaxin, Ding Yongjian, Zeng Guoxiong, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3315−3324.]

[8] 朱世丹, 张飞, 张海威, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1707−1721. [Zhu Shidan, Zhang Fei, Zhang Haiwei, et al. Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1707−1721.]

[9] 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1706−1713. [Zhang Jie, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan, et al. Hydrochemical characteristic and their controlling factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1706−1713.]

[10] 张月, 张飞, 王娟, 等. 近40年艾比湖湿地自然保护区生态干扰度时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7082−7097. [Zhang Yue, Zhang Fei, Wang Juan, et al. Analysis of the temporal and spatial dynamics of landscape patterns and hemeroby index of the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, over the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7082−7097.]

[11] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1873−1884. [Lei Mi, Zhou Jinlong, Zhang Jie, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1873−1884.]

[12] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 基于氢氧稳定同位素的艾比湖流域地表水与地下水转化关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 172−177, 185. [Hao Shuai, Li Fadong, Li Yanhong, et al. Transformation between surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin based on hydrogen and oxygen stable isotopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 172−177, 185.]

[13] 玛尔胡拜·牙生, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 新疆天山西段夏季河流水化学特征及其影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 600−609. [Yaerhubai Yasheng, Ma Long, Jilili Abuduwaili, et al. Hydrochemical characteristics and their influence on rivers in the western part of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 600−609.]

[14] 袁振辉, 李秋华, 何应, 等. 基于贝叶斯方法的贵州高原百花水库水体营养盐变化及评价(2014−2018年)[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1623−1636. [Yuan Zhenhui, Li Qiuhua, He Ying, et al. Variation and evaluation of nutrients in Baihua Reservoir in Guizhou Plateau based on Bayesian method, 2014−2018[J]. Lake Sciences, 2019, 31(6): 1623−1636.]

[15] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2817−2825. [Liu Xin, Xiang Wei, Si Bingcheng. Hydrochemistry and its controlling factors and water quality assessment of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2817−2825.]

[16] 秦国强. 温泉县城西地下水水源地可行性评价[J]. 地下水, 2020, 42(6): 35−36, 49. [Qin Guoqiang. Feasibility evaluation of

west groundwater source in Wenquan County[J]. Ground Water, 2020, 42(6): 35-36, 49.]
[17] 王彩华, 陶澄宇, 邹英, 等. 新疆维吾尔自治区环境地质图集[M]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质环境监测院, 2005. [Wang Caihua, Tao Chengyu, Zou Ying, et al. Environmental geology atlas of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Urumqi: Geological Environment Monitoring Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2005.]
[18] 巴雅尔, 郭家盛, 卢少勇, 等. 博斯腾湖大湖湖区近20年生态健康状况评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 503-507. [Ba Yaer, Guo Jiasheng, Lu Shaoyong, et al. Assessing ecological health of open water region from Bostenhu Lake during last 20 years[J]. China Environmental Science, 2013, 33(3): 503-507.]
[19] 杨咪, 屈文岗, 钱会. 基于熵权的贝叶斯模型及其在水质评价中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 85-90. [Yang Mi, Qu Wengang, Qian Hui, et al. Bayesian model based on entropy weight and its application in water quality assessment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 85-90.]
[20] 宋新山, 邓伟, 章光新, 等. 钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J]. 水利学报, 2000(7): 70-76. [Song Xinshan, Deng Wei, Zhang Guangxin, et al. Sodium adsorption ratio and its application to appraisement of alkali characteristics of water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(7): 70-76.]
[21] 张志强, 张强, 刘超飞, 等. 四川省简阳市地下水水化学特征及灌溉适宜性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 67-74. [Zhang Zhiqiang, Zhang Qiang, Liu Chaofei, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and it suitability for irrigation in Jianyang City of Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 67-74.]
[22] 毛萌, 朱雪芹. 宣化盆地地下水化学特性及灌溉适用性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 142-149. [Mao Meng, Zhu Xueqin. Chemical characteristics of groundwater in Xuanhua Basin and assessment of irrigation applicability[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(7): 142-149.]
[23] Sarin M M, Krishnasswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahamputra river systems, India[J]. Nature, 1984, 312: 538-541.
[24] Fitts C R. Groundwater Science[M]. Amsterdam: Academic Press, 2002.
[25] 余石勇, 刘孟, 赵元艺, 等. 西藏麻米错盐湖大型锂硼矿盆地水化学特征[J/OL]. 地质学报: 1-11[2021-11-10]. [Yu Shiyong, Liu Meng, Zhao Yuanyi, et al. Hydrochemical characteristics of large-scale lithium-boron mine basin in the Mami Co Saline Lake, Tibet[J/OL]. Acta Geologica Sinica: 1-11[2021-11-10].]
[26] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 131-142. [Tang Xiwen, Wu Jinkui, Xue Liyang, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin River Basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142.]
[27] 冯国平, 高宗军, 蔡五田, 等. 豫北山前修武地区地下水水化学特征及水质评价[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 27-34. [Feng Guoping, Gao Zongjun, Cai Wutian, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Xiuwu area of North Henan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 27-34.]
[28] 任晓辉, 吴玺, 高宗军, 等. 酒泉东盆地地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 109-116. [Ren Xiaohui, Wu Xi, Gao Zongjun, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanisms of groundwater in Jiuquan East basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (10): 109-116.]
[29] 刘敏, 赵良元, 李青云, 等. 长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1243-1254. [Liu Min, Zhao Liangyuan, Li Qingyun, et al. Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River[J]. China Environmental Science, 2021, 41(3): 1243-1254.]
[30] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1750-1760. [Li Jun, Zou Shengzhang, Zhao Yi, et al. Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian Karst Wetland, China[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1750-1760.]
[31] 严宇鹏, 牛凤霞, 刘佳, 等. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 815-825. [Yan Yupeng, Niu Fengxia, Liu Jia, et al. Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer[J]. China Environmental Science, 2022, 42(2): 815-825.]
[32] 张艳, 吴勇, 杨军, 等.阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237. [Zhang Yan, Wu Yong, Yang Jun, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3230-3237.]
[33] Liu J T, Wang M, Gao Z J, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in the Yishu River basin[J]. Acta Geophysica, 2020, 68(8): 877-889.
[34] 纪媛媛, 周金龙, 孙英, 等. 新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(3): 551-560. [Ji Yuanyuan, Zhou Jinlong, Sun Ying, et al. Groundwater chemical characteristics and quality evaluation for groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 551-560.]
[35] Yang Q, Li Z, Ma H, et al. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the southeastern part of Ordos basin, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 218(11): 879-888.
[36] 胡漾, 唐金平, 陈友良, 等. 基于PCA与熵权的贝叶斯地下水环境质量评价模型[J]. 节水灌溉, 2018(12): 60-64. [Hu Yang, Tang Jinping, Chen Youliang, et al. Bayesian groundwater environmental quality assessment model based on principal component analysis and entropy weight[J]. Water Saving Irrigation, 2018(12):

60–64.]

[37] 张文琦, 董少刚, 马铭言, 等. 岱海盆地地下水化学特征及成因[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1546–1555. [Zhang Wenqi, Dong Shaogang, Ma Mingyan, et al. Chemical characteristics sand origin of groundwater in the Daihai Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1546–1555.]

[38] 冯翠娥, 高存荣, 王俊涛, 等. 内蒙古河套平原浅层高铁高氟地下水分布与成因[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 67–76. [Feng Cui'e, Gao Cunrong, Wang Juntao, et al. Distribution and causes of high-iron and high-fluoride shallow groundwater in the Hetao Plain of Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(1): 67–76.]

[39] 刘宗潇, 朱成立, 翟亚明, 等. 微咸水灌溉对土壤EC值及冬小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 59–64. [Liu Zongxiao, Zhu Chengli, Zhai Yaming, et al. Influence of brackish water irrigation on soil EC and yield of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 59–64.]

An assessment of groundwater, surface water, and hydrochemical characteristics in the upper valley of the Bortala River

DING Qizhen[1,2,3], LEI Mi[1,2,3], ZHOU Jinlong[1,2,3], ZHANG Jie[4], XU Dongsheng[5]

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 4. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530100, Guangxi, China; 5. Zhongshui North Engineering Design & Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: This paper examined the hydrochemical characteristics and water quality status of groundwater and surface water in the upper valley of the Bortala River, Xinjiang. The examination was based on 36 groups of water sample data. Hydrochemical characteristics and their influencing factors were studied by Piper diagram, correlation analyses, Gibbs diagram and ion ratio, and the entropy-Bayesian water quality evaluation model, Wilcox and USSL diagrams were used to evaluate water quality. Results of hydrochemical analyses showed the following: (1) the mechanical well water, spring water, and river water in the study area were weakly alkaline fresh water, and total hardness (TH), F^-, NO_3^- and total dissolved solids were aligned as mechanical well water > spring water > river water, whereas HCO_3^- and Ca^{2+} were the dominant anions and cations, respectively. Contents of each component in the upper Bortala River increased along the river. (2) The main hydrochemical types of mechanical well water and spring water in the area were the HCO_3-Ca type, and main hydrochemical types of river water were the HCO_3-Ca and $HCO_3 \cdot SO_4$-Ca · Na types. Hydrochemical characteristics were controlled mainly by rock weathering, and hydrochemical components were mainly from carbonate rock weathering. Evaporation rock dissolution also occurred and it was affected by cation exchange and human activities. The water quality evaluation of drinking water showed that 82.6% of mechanical well water and 100% of spring water were suitable for drinking, basically suitable for drinking, or suitable for drinking after proper treatment. Water sample points that were not suitable for drinking were affected mainly by excessive Fe, F^-, and NO_3^-. River water, well water, and spring water were suitable for the evaluation of irrigation water quality.

Keywords: hydrochemical characteristics; water quality assessment; entropy-Bayesian water quality model; upper valley of Bortala River; Xinjiang